

Chapitre 6

Hydrogéologie

Échelle de temps

L'échelle de temps à considérer est déterminée par la durée du *surstockage* d'eau de Seine dans les casiers. Elle devrait s'étendre sur quelques dizaines de jours (décades), ce qui est extrêmement peu en comparaison des temps caractéristiques du fonctionnement du système aquifère. On peut donc considérer que l'impact hydrogéologique du Projet Bassée sera essentiellement *local* ; il n'est donc pas nécessaire de considérer un domaine spatial beaucoup plus étendu que celui du Projet Bassée lui-même.

Le système aquifère

Une étape essentielle de la modélisation est celle de l'identification des *unités hydrogéologiques* qui constituent le système aquifère et qui doivent être représentées dans le modèle. Classiquement, la conceptualisation d'un système aquifère est fondée sur la distinction entre trois types d'unités hydrogéologiques, ayant des modes de fonctionnement tranchés :

- les *aquifères* sont des formations géologiques qui, du fait de leur perméabilité élevée, permettent la circulation *horizontale* de l'eau souterraine sur des distances de l'ordre de leur extension géographique. Les aquifères sont des formations exploitables par forage, dans des conditions économiques acceptables ;
- les *aquitards* sont des formations géologiques qui, en raison de leur perméabilité significativement moins élevée que celle des aquifères adjacents, permettent la transmission *verticale* de l'eau souterraine entre ces deux aquifères. Les aquitards ne sont pas exploitables par forage. L'analyse théorique des écoulements dans les aquitards montre que, dans un système aquifère, le rôle d'un aquitard peut varier considérablement selon l'échelle de temps considérée ;
- les *aquicludes* sont des formations géologiques qui, en raison de leur très faible perméabilité, ne contribuent pas significativement aux écoulements souterrains dans l'intervalle de temps considéré.

Les Alluvions modernes. En raison de leur situation perchée, les Alluvions modernes ne sont pas saturées en permanence ; elles ne constituent donc pas une unité hydrogéologique. On suppose qu'à l'échelle d'une surface de 50 m × 50 m, qui est celle d'une maille, elles sont traversées par des écoulements essentiellement verticaux, fortement variables au cours du temps. Les Alluvions modernes ont deux rôles importants :

1. Elles constituent une interface à travers laquelle s'effectuent les échanges entre l'atmosphère et les Alluvions anciennes ;
2. Elles constituent le toit des Alluvions anciennes sous-jacentes.

Deux caractéristiques des Alluvions modernes sont prises en compte dans le modèle : leur épaisseur et leur perméabilité verticale.

Les Alluvions anciennes. Cette formation, apparemment homogène, très caractéristique de la Bassée, est à la fois le siège d'un aquifère et d'un gisement de granulats. Ces deux aspects étant peu compatibles, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) a cherché à préserver l'aquifère en acquérant des terrains, appelés *barêtes* ou *gîtes aquifères*. Les conditions d'exploitation de l'aquifère dans ces barêtes seraient particulièrement favorables. Il pourrait se poser un autre problème de compatibilité entre le *surstockage* d'eau de Seine dans les casiers et l'exploitation de l'aquifère des Alluvions anciennes au moyen de captages implantés dans les barêtes. Ce problème n'est pas traité dans le présent rapport.

Les Alluvions anciennes doivent être représentées en tant qu'aquifère dans le modèle ; c'est l'aquifère principal du système de la Bassée.

La Craie. Dans l'environnement du Projet Bassée, on peut distinguer trois conditions de gisement de la Craie :

- la Craie sous la couverture Tertiaire du plateau d'Ile-de-France ;
- la Craie qui, dans l'emprise de la plaine alluviale de la Seine, est recouverte par les Alluvions anciennes ;
- la Craie qui, hors de l'emprise de la plaine alluviale de la Seine, n'est recouverte que par des colluvions et des limons de plateaux.

Ces différentes formes de craie appartiennent à une même unité hydrogéologique d'extension régionale, la « nappe de la Craie » du Bassin de Paris.

La Craie profonde, compacte et non altérée, est très peu perméable ; elle doit être considérée comme un *aquiclude*. Elle est surmontée par quelques dizaines de mètres d'une Craie superficielle, constituée de blocs plus ou moins fissurés, délimités par des fractures. La Craie superficielle est un milieu aquifère à double porosité. Les densités de fissuration et de fracturation déterminent les propriétés hydrodynamiques.

Dans la Bassée, la Craie constitue le substratum des Alluvions et affleure au nord et au sud de la plaine alluviale. Dans ces zones d'affleurement, la nappe de la Craie est rechargée par l'infiltration des précipitations. Après un parcours souterrain plus ou moins long et tortueux dans la Craie, l'eau de la nappe de la Craie, pénètre dans les Alluvions où elle poursuit son cheminement jusqu'à ce qu'elle atteigne un exutoire, naturel ou artificiel. Les exutoires naturels sont l'atmosphère (évapo-transpiration) et les cours d'eau (drainage) ; les exutoires artificiels sont les forages productifs. Au même titre que les Alluvions anciennes, la Craie doit être représentée comme un *aquifère* dans le modèle.

La grande majorité des forages qui, après avoir traversé les Alluvions modernes et anciennes, ont pénétré dans la Craie, ont trouvé une forme spéciale de Craie, qualifiée de marneuse par SOBESOL, de pâteuse par le BRGM. L'existence, sous les Alluvions anciennes, d'une couche de craie désagrégée, moins perméable que celle qui constitue normalement l'aquifère de la Craie, pourrait contribuer à limiter les débits de fuite des casiers.

Un rapport du BRGM¹ suggère que l'altération de la Craie pourrait être un phénomène ancien, d'âge Éocène. En effet, on a mis en évidence une altération de la Craie sous la couverture des formations Tertiaires du plateau d'Ile-de-France. Une telle altération aurait pu, aussi bien, affecter la Craie dans la Bassée.

C. Mégien (1967, 1976), qui avait observé et décrit de nombreux échantillons prélevés dans la Bassée, penchait plutôt pour une altération quaternaire liée à la succession de cycles glaciaires. C'est à ce type d'altération que l'on attribue la fissuration et la fracturation de la partie supérieure de la Craie,

¹Vernoux J.-F., S. Schomburgk, F. Hanot, M. Donsimoni (2004). Projet d'aménagement du site de la Bassée – analyse des travaux de reconnaissance réalisés en 2002–2003. Rapport final. BRGM 52712-FR.

là où elle affleure. L'examen des échantillons de craie prélevés dans la Bassée montre effectivement une importante action du gel.

L'annexe H présente une analyse de la répartition spatiale des faciès de craie au contact des Alluvions de la Bassée. Cette analyse s'appuie sur d'assez nombreuses coupes géologiques de sondages, en particulier sur celles de l'étude « Possibilités aquifères... » (BRGM, 1967).

L'hypothèse d'une altération antérieure au dépôt des Alluvions anciennes paraît difficilement compatible avec la forme « en auge » du toit de la craie, sous les Alluvions de la Bassée. Cette morphologie s'explique par l'action érosive, sur un substratum relativement dur, d'écoulements fluviaux transportant des charges solides importantes et même, pendant les plus grandes crues, des éléments solides de grandes dimensions. On les trouve actuellement mêlés aux Alluvions anciennes. L'existence d'un substratum mécaniquement résistant explique aussi la netteté de la transition Craie-sables et graviers observée dans les sondages.

Le premier stade de l'altération de ce substratum dur serait dû à une relaxation anisotrope des contraintes mécaniques, liée à l'ablation de matière par l'érosion, et à l'action du gel, deux processus homogènes. Le développement ultérieur de cette altération serait dû à la dissolution de la calcite par l'écoulement souterrain. La proximité géographique entre les zones de recharge et de drainage de la nappe de la Craie peut expliquer que l'eau de la nappe de la Craie ait conservé, et conserve peut-être encore, une certaine agressivité vis à vis de la « Craie supérieure ».

La question du mécanisme d'altération de la Craie sous les Alluvions ancienne de la Bassée n'est pas seulement académique. Elle a des conséquences pour la conceptualisation du système aquifère et, donc, pour la modélisation. L'altération Éocène, liée aux rivières qui ont entaillé les argiles yprésiennes, ne devrait, en supposant qu'elle ait été la seule à agir, affecter qu'une partie de la Craie sous-alluviale. Il subsisterait des plages de craie « saine ». Le rapport BRGM (2004) suggère même que cette craie saine pourrait être karstifiée. Par contre, l'altération Quaternaire, combinant des mécanismes thermo-mécaniques et géochimiques, devrait produire une craie relativement homogène dans l'espace.

Les deux mécanismes d'altération ne sont pas incompatibles. Cependant, l'altération quaternaire est liée à un très grand nombre de faits géologiques à l'échelle continentale. Il semble donc difficile d'admettre que l'altération Éocène sous couverture, même si elle s'est effectivement produite, puisse, à elle seule, expliquer la nature et la répartition spatiale des faciès de la « Craie supérieure » dans la Bassée.

L'existence de conduits karstiques dans la Craie de la Bassée ne peut être exclue *a priori*. Cependant, les karsts connus dans la Craie se sont formés en situation perchée par rapport au niveau de base des écoulements, situation qui n'a jamais été celle de la Craie de la Bassée. Aucun indice net de karstification n'a été relevé dans les forages, en géophysique, ou dans la piézométrie de la Bassée. La question de l'existence de structures karstiques reste évidemment ouverte tant que l'état de notre information est fragmentaire. Cependant, on peut considérer que la probabilité d'existence de structures karstiques dans la zone du Projet Bassée est faible.

Le tableau 6.1 récapitule des valeurs de paramètres physiques mesurés par TERRASOL sur des échantillons prélevés dans des sondages du Projet Bassée.

TAB. 6.1: Conductivités hydrauliques mesurées sur échantillons (d'après TERRASOL).

Formation	k_x (m s ⁻¹)	k_z (m s ⁻¹)
Alluvions modernes 1	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻⁹
Alluvions modernes 2	10 ⁻¹⁰ à 10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻¹⁰
Alluvions anciennes	10 ⁻⁴ à 10 ⁻²	5 × 10 ⁻⁵ à 5 × 10 ⁻³
Craie altérée	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁵	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁶
Craie « saine »	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁵

Les Alluvions modernes 1 sont des « sables fins, limons et/ou argiles ». Les Alluvions modernes 2 sont des « argiles molles, parfois vasardes, rarement tourbeuses ». La craie altérée est une « marne plus ou moins crayeuse, molle, avec parfois des graviers et des silex ». La « craie saine » est une « craie marneuse avec parfois des silex ».

La Craie altérée correspond à la « Craie supérieure » du modèle; elle serait de 100 à 1 000 fois moins perméable que les Alluvions anciennes, et 10 fois moins perméable que la Craie « saine ». Ces mesures confirment l'impression que laisse un examen visuel des échantillons, celle d'un milieu effectivement très peu perméable, ressemblant à de l'argile.

Ceci conduit, dans le modèle, à représenter la « Craie supérieure » sous la forme d'un *aquitard*. Il faut toutefois noter que cette interprétation est fondée principalement sur des arguments qualitatifs, les données quantitatives étant peu nombreuses.

Définition des limites

- Pour définir l'extension horizontale des couches du modèle, les documents suivants ont été utilisés :
- carte géologique à 1/50 000 : feuilles de Montereau-Fault-Yonne (XXV-17 (295)), Sergines (XXVI-17 (296)), Nangis (XXV-16 (259)) et Provins (XXVI-16 (260)) ;
 - cartes IGN à 1/25 000, feuilles de Montereau-Fault-Yonne (2517 O), Nogent-sur-Seine (2616 E), Nangis (2516 O), Bray-sur-Seine, Sergines (2617 O), Pont-sur-Yonne (2517 O), Donnemarie-Dontilly (2516 E) et Provins (2616 O) ;
 - carte 4-III-4 (Surface piézométrique de la nappe (mi-septembre 1965)) de l'étude « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine ».

Alluvions. L'extension de la couche des Alluvions est définie, au nord et au sud, par des limites géologiques; ces deux limites se rejoignent à Montereau. Vers l'est, l'extension de la couche des Alluvions est définie par des limites hydrauliques; les Alluvions se poursuivent au-delà.

Le tracé des limites nord et sud a été emprunté aux planches de l'étude « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine ».

Vers l'est :

- la Voulzie draine, en rive droite, la nappe phréatique des Alluvions. Ceci implique qu'il existe une surface verticale à flux nul, dont l'axe longitudinal de la Voulzie serait la trace. Cette interprétation est fondée sur les cartes piézométriques de l'étude BRGM (1967) ;
- en amont de la confluence Voulzie-Seine, la couche des Alluvions est limitée par la Seine et va jusqu'en un point où le fleuve devient très proche de la limite géologique d'extension des Alluvions.

À l'intérieur de la couche des Alluvions, il existe deux autres limites hydrauliques : la Seine et l'Auxence.

La Seine est une limite interne à potentiel imposé en raison d'une part de sa connexion hydraulique permanente avec le système aquifère (Alluvions et Craie), d'autre part de l'importance de son débit. Les débits qui traversent les interfaces Seine-aquifère sont trop faibles, en valeur relative, pour avoir une influence significative sur la cote de la Seine qui, de plus, est artificiellement contrôlée par les barrages de navigation.

L'Auxence est aussi une limite hydraulique interne. Comme la Voulzie, elle n'entaille que partiellement les Alluvions modernes. Pour cette raison, dans le modèle, l'Auxence et la Voulzie sont représentées par des conditions aux limites d'un type particulier, appelées conditions de drain (voir chapitre 8).

Les influences du canal de navigation Bray-la Tombe et du canal de la SAGEP sur les écoulements souterrains sont considérées comme nulles.

Craie supérieure. L'extension de la couche de la Craie supérieure est la même que celle des Alluvions.

Craie inférieure. La couche de la Craie inférieure représente une partie de l'aquifère de la Craie du Bassin de Paris. Pour définir son extension horizontale, deux critères peuvent être considérés :

1. La recharge de la nappe ;
2. La propagation horizontale des *surcharges* hydrauliques générées par le *surstockage* d'eau dans les casiers.

Si on choisit la recharge comme critère, le domaine à prendre en compte dans le modèle est la partie de l'aquifère de la Craie dans laquelle les lignes de courant de l'écoulement souterrain convergent vers la Bassée. Dans la partie de la Craie comprise entre la Seine et l'Yonne, les lignes de courant de l'écoulement souterrain se dirigent soit vers la Seine, soit vers l'Yonne. Ces deux ensembles des lignes de courant sont séparés par une surface verticale à flux nul, dont la position varie au cours du temps. On peut cependant raisonnablement supposer qu'en moyenne, sa trace à la surface du sol coïncide avec la ligne de partage des eaux entre le bassin-versant de la Seine et celui de l'Yonne, à l'amont de Montereau. Cette ligne peut facilement être déterminée en utilisant les cartes topographiques. Cette délimitation donne une aire d'alimentation réaliste pour la Craie inférieure.

Si on choisit comme critère la propagation horizontale des *surcharges* hydrauliques depuis les casiers, la logique est différente. En théorie, ces *surcharges* peuvent se propager jusqu'à l'Yonne. Il est cependant tout à fait invraisemblable que des *surcharges* hydrauliques significatives puissent effectivement se propager jusqu'à l'Yonne en quelques dizaines de jours ; il faudrait plutôt des années ou des décennies.

On peut donc, vers le sud, limiter l'extension de la Craie à la ligne de crête qui sépare les versants inclinés respectivement vers la Seine et vers l'Yonne.

Au nord de la plaine alluviale, la Craie affleure sous une couche de limons, puis plonge sous le plateau Tertiaire d'Ile-de-France. Il est admis que la perméabilité de la Craie diminue fortement vers le centre de ce plateau. Il est tout à fait invraisemblable que des *surcharges* hydrauliques significatives puissent, en quelques dizaines de jours, se propager des casiers au plateau d'Ile-de-France. On peut donc, vers le nord, limiter l'extension de la Craie au rebord de ce plateau. Dans le modèle, la limite de la Craie inférieure est la courbe-enveloppe des digitations de la ligne de contact entre la craie (Campanien C6) et l'« Yprésien » (e3-4), du côté plateau d'Ile-de-France.

Conditions aux limites hydrauliques

Pour spécifier les conditions aux limites de type potentiel imposé (Seine) ou de type drain (Auxence, Voulzie et drains artificiels), on peut avoir besoin de connaître le profil longitudinal du fil d'eau des cours d'eau correspondants.

L'étude photogrammétrique a fourni des points cotés pour la Seine, l'Auxence et la Voulzie, mais de manière non systématique.

Sur les cartes piézométriques de l'étude « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine » figurent des reports de mesures d'altitudes du fil d'eau.

Pour construire les profils en long de la Seine, de l'Auxence et de la Voulzie, nous avons relevé tous les points cotés figurant sur les documents disponibles (cartes AXIS-CONSEIL et cartes BRGM), puis converti les coordonnées en Lambert 93. Nous avons élaboré un modèle géométrique de l'axe de la Seine (« ancienne » et « actuelle »), de l'Auxence et de la Voulzie en spécifiant des points de définition de ces axes. La distance entre deux tels points est d'environ 20 m. Chaque axe est représenté par une ligne brisée. Les points cotés ont ensuite été projetés sur ces axes, afin de leur attribuer une abscisse curviligne. *Idem* pour les centres de mailles représentant une rivière.

Les reports de l'altitude du fil d'eau en fonction de la position du point coté sur l'axe de la rivière montrent quelques incohérences mineures, notamment dans la partie aval de la Seine (altitude

constante sur une longue distance, altitudes croissantes de l'amont vers l'aval...). Les charges hydrauliques imposées dans les mailles ont été calculées en tenant compte de l'emplacement des barrages de navigation (discontinuité du fil d'eau) et de la position de chaque maille sur l'axe du cours d'eau qu'elle représente.

Les figures 6.1 à 6.8 montrent les profils qui peuvent être utilisés dans la définition des conditions aux limites du modèle hydrogéologique.

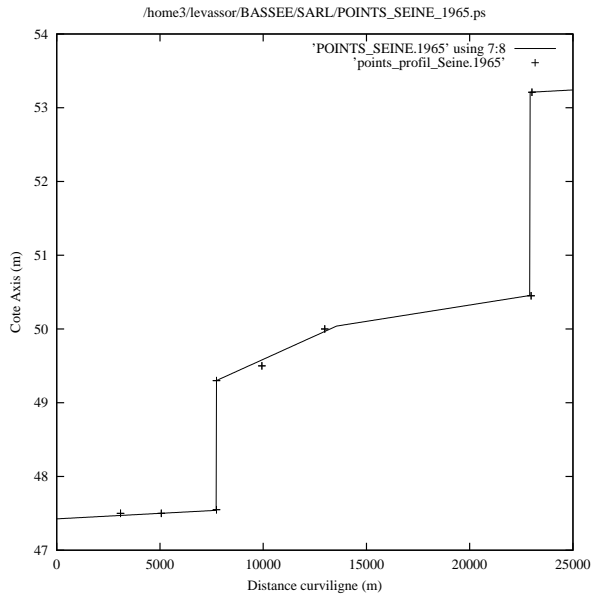


FIG. 6.1: Points de définition du profil en long de la Seine, variante 1965.

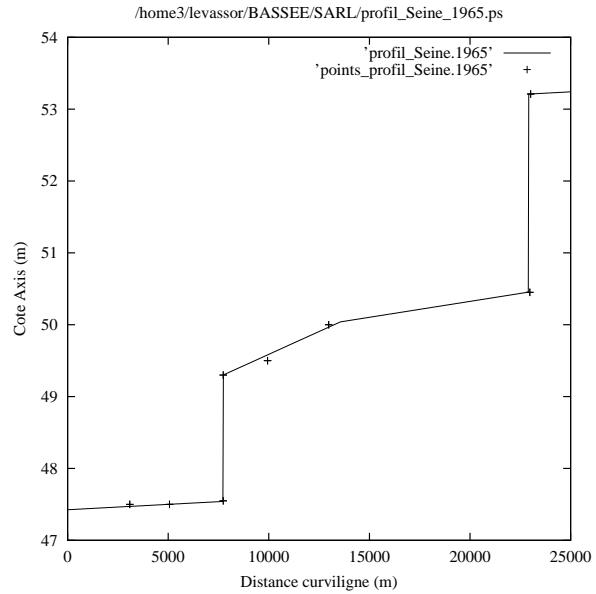


FIG. 6.2: Profil en long de la Seine, variante 1965.

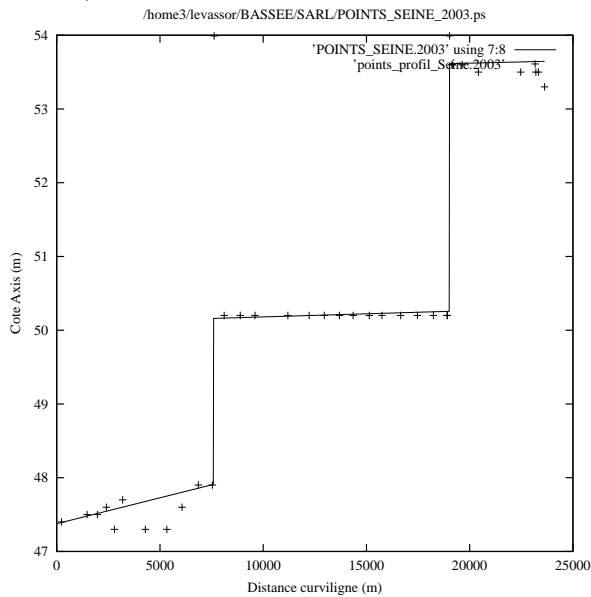


FIG. 6.3: Points de définition du profil en long de la Seine, variante 2003.

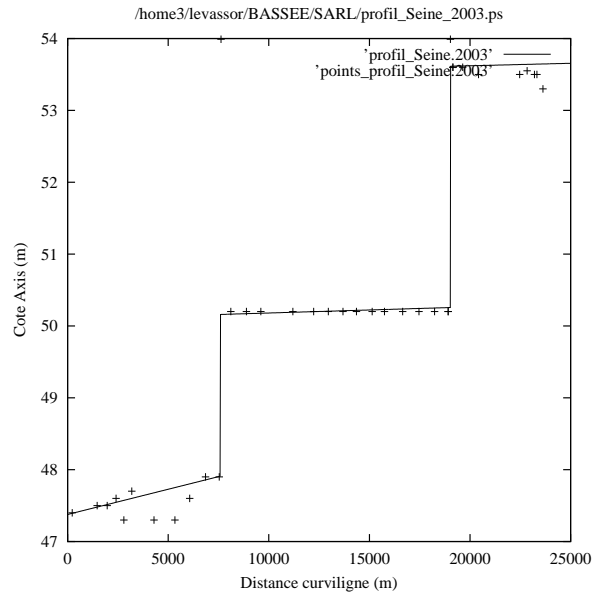


FIG. 6.4: Profil en long de la Seine, variante 2003.

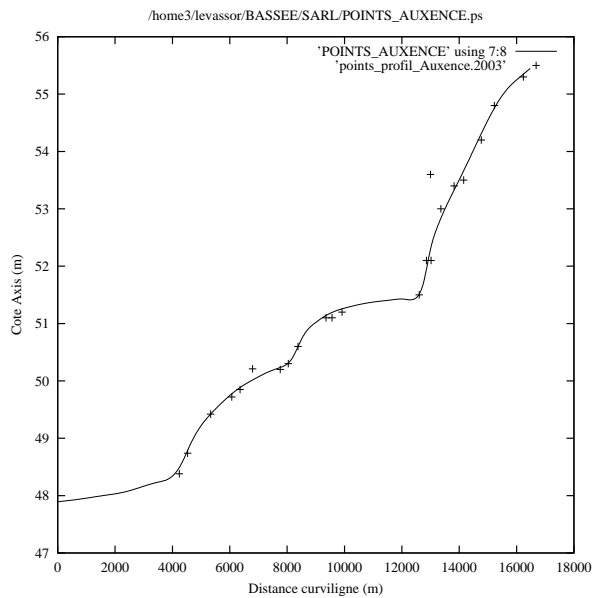


FIG. 6.5: Points de définition du profil en long de l'Auxence.

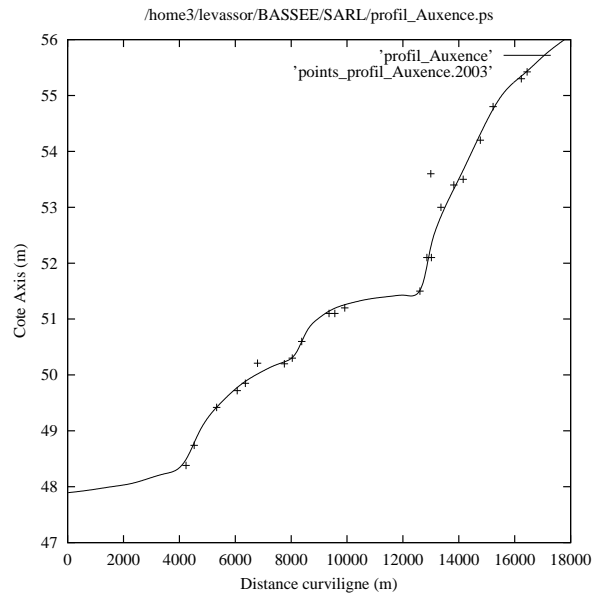


FIG. 6.6: Profil en long de l'Auxence.

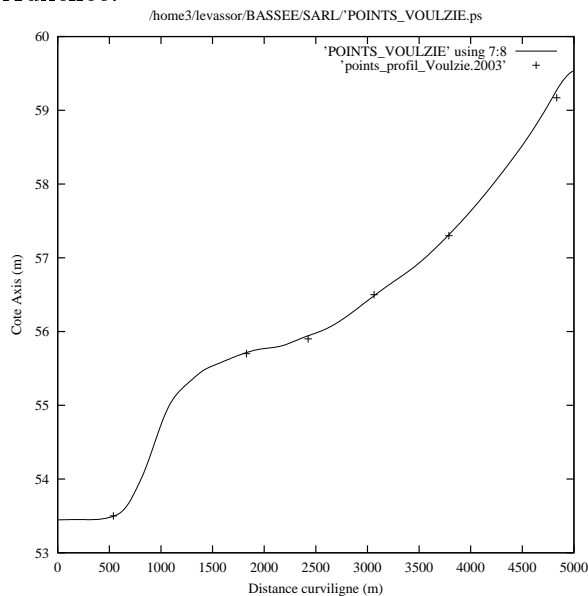


FIG. 6.7: Points de définition du profil en long de la Voulzie.

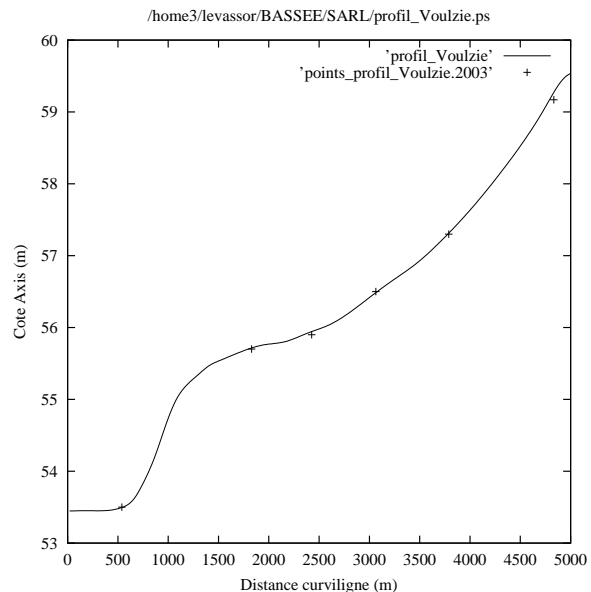


FIG. 6.8: Profil en long de la Voulzie.

Paramètres du modèle hydrogéologique

Les paramètres du modèle hydrogéologique sont :

- des épaisseurs ;
- des conductivités hydrauliques ;
- des transmissivités ;
- des coefficients d'emmagasinement.

Épaisseurs. Dans le modèle, les épaisseurs interviennent indirectement, comme facteurs de pondération de conductivités hydrauliques. Si deux milieux d'épaisseurs e_1 et e_2 et de conductivités hydrauliques K_1 et K_2 sont successivement traversés par un écoulement, la conductivité hydraulique

homogène équivalente \tilde{K} est :

$$\frac{E}{\tilde{K}} = \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_2}{K_2}$$

où $E = e_1 + e_2$.

La variabilité des conductivités hydrauliques étant beaucoup plus grande que celle des épaisseurs, on peut négliger les variations de ces dernières dans les calculs de conductivité hydraulique équivalente.

Conductivités hydrauliques. Les conductivités hydrauliques prises en compte dans le modèle sont, en général, celles de niveaux relativement peu épais, non représentés en tant que couches dans le modèle. Ces niveaux sont :

- les Alluvions modernes ;
- les colmatages des interfaces eau libre–aquifère.

La conductivité hydraulique verticale des Alluvions modernes est l'un des paramètres qui peut avoir une influence importante sur les débits de fuite des casiers ; il caractérise l'étanchéité d'une partie des casiers. À la demande de l'IBRBS, la société AH2D a effectué des mesures de la perméabilité verticale des Alluvions modernes dans la zone d'étude du Projet Bassée. Les résultats de ces mesures, donnés en annexe F, sont récapitulés dans le tableau 6.2. Les zones boisées ou marécageuses sont sous-représentées dans l'échantillon.

Ces mesures montrent que la perméabilité verticale des Alluvions modernes a une variabilité spatiale importante. Si on écarte les quelques valeurs supérieures à $\approx 2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, que la technique de mesure n'a pas permis de préciser, les valeurs mesurées sont distribuées sur l'intervalle ($2.55 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ à $2.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$), soit quatre ordres de grandeur.

TAB. 6.2: Statistiques des conductivités hydrauliques verticales des Alluvions modernes.

K_v	Nombre de mesures	Fréquence
$K_v < 10^{-7}$	2	2.1 %
$10^{-7} \leq K_v < 10^{-6}$	20	21.0 %
$10^{-6} \leq K_v < 10^{-5}$	59	62.1 %
$10^{-5} \leq K_v < 10^{-4}$	11	11.6 %
$10^{-4} \leq K_v$	3	3.1 %

La figure 6.9 montre la distribution des mesures de la conductivité hydraulique verticale K_v des Alluvions modernes dans un système de coordonnées x -gaussien, y -logarithmique. Les points sont *grosso modo* alignés. Le logarithme de K_v suit une loi de distribution log-normale : la moyenne est $\approx 2.9 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$; 95 % de valeurs sont comprises entre $1.3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ et $4.8 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Il y a des raisons de penser que ces valeurs peuvent être *surestimées* :

- elles ne sont représentatives que de la partie supérieure des Alluvions modernes, disons du premier mètre après décapage de la terre végétale. Or, comme on l'a vu, la fréquence de l'argile tend à augmenter de la surface vers la base des Alluvions modernes ;
- l'une des hypothèses du modèle que l'on utilise pour déduire la valeur de la perméabilité des mesures de niveau d'eau est que le sol est *homogène*. Or les Alluvions modernes ne le sont manifestement pas. Si, par exemple, une couche perméable (limon sableux) repose sur une couche peu perméable (argile), l'écoulement ne sera pas freiné autant qu'il devrait l'être ; l'eau s'étalera horizontalement à la surface de l'argile et, au lieu de mesurer la conductivité de l'argile, on mesure celle du limon, qui est très supérieure. D'où un effet de *surestimation*.

Il y a aussi des raisons de penser qu'un effet d'échelle joue dans le sens d'une augmentation de la perméabilité verticale des Alluvions modernes. En effet, celles-ci peuvent être traversées, partiellement ou totalement, par des macropores (moules externes d'anciennes racines, terriers...) que l'on cherche

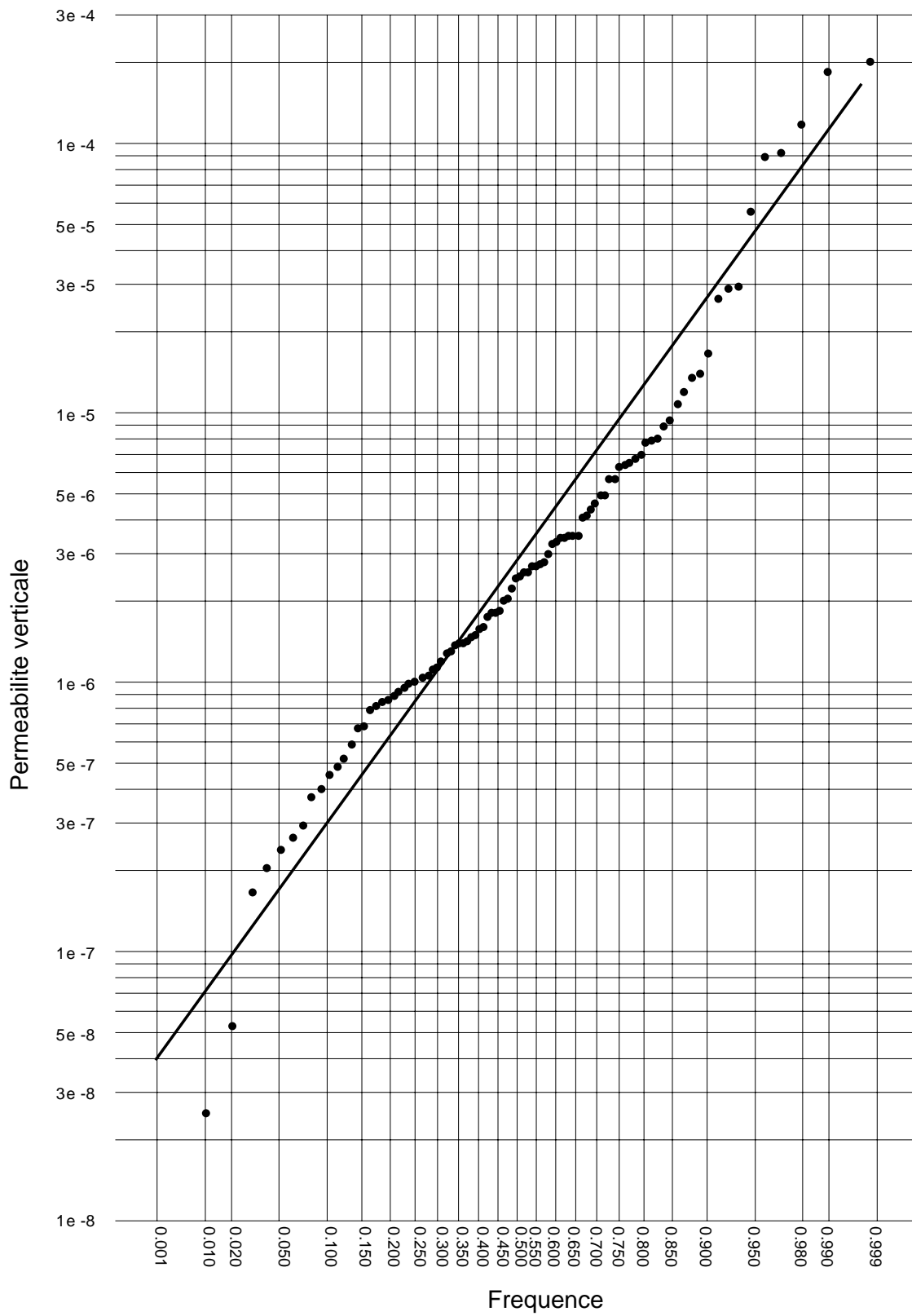


FIG. 6.9: Ajustement d'une loi log-normale aux valeurs mesurées de la conductivité hydraulique verticale des Alluvions modernes.

à éviter en faisant des mesures ponctuelles. Pour pouvoir apprécier la réalité et l'importance de ce phénomène, il faudrait faire des essais sur de beaucoup plus grandes surfaces, par exemple dans des casiers expérimentaux.

Transmissivités. La transmissivité est un paramètre hydrodynamique qui intervient dans les équations qui décrivent les écoulements souterrains bi-dimensionnels horizontaux. La définition de la transmissivité est

$$T(x, y) = \int_{z_{\text{mur}}}^{z_{\text{toit}}} K(z; x, y) dz$$

$T(x, y)$ est la transmissivité de l'aquifère au point de coordonnées horizontales (x, y) ; z_{mur} est l'altitude du mur de l'aquifère au point (x, y) ; z_{toit} est l'altitude du toit de l'aquifère au point (x, y) ; $K(z; x, y)$, $z_{\text{mur}} \geq z \geq z_{\text{toit}}$ est, sur la verticale (x, y) , la conductivité hydraulique horizontale à l'altitude z .

Il existe des techniques éprouvées (essais de pompage) pour mesurer des transmissivités représentatives de cylindres d'aquifère pouvant avoir des dimensions comparables à celles des mailles du modèle.

Dans le cadre de l'étude « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine » (BRGM, 1967), vingt essais de pompage ont été réalisés dans des forages qui captaient une partie des Alluvions anciennes et la partie supérieure de la Craie. Des essais plus anciens ont été réalisés, dans des conditions similaires, par la SAFEGE à Montereau, et par la CGE à Balloy, Châtenay et Gravon.

Deux campagnes distinctes ont été réalisées par le BRGM (1965). La première campagne, effectuée « sans attendre la totalité des résultats des sondages de reconnaissance géologique », a comporté 10 essais. La seconde campagne, comportant également 10 essais, a été effectuée « après reconnaissance complète des Alluvions anciennes et après que les enseignements des premiers essais aient été tirés ». Deux essais de débit d'une durée d'un mois ont été effectués sur 2 forages. Ces indications manifestent une recherche, pour y effectuer des essais, de sites favorables à une exploitation intensive de l'aquifère. L'échantillon constitué par ces 20 essais a donc des chances d'être statistiquement biaisé (*surreprésentation* des fortes valeurs).

Les résultats des essais BRGM (1965) sont reproduits dans le tableau 6.3, où Q est le débit de pompage, t est la durée de l'essai, Δ est le rabattement mesuré, S est le coefficient d'emménagement, T est la transmissivité mesurée, K est la conductivité hydraulique moyenne.

L'annexe G, outre ces données, présente des résultats obtenus par le PIREN-SEINE dans le contexte perturbé d'un ensemble de gravières situées à Vimpeles.

Les trois essais CGE ont donné des résultats comparables.

La figure 6.10 montre un histogramme des 20 mesures de transmissivité des Alluvions anciennes (BRGM, 1965). Le numéro de classement est en abscisse; la transmissivité mesurée est en ordonnée.

TAB. 6.3: Résultats des essais de pompage BRGM (1965)

Essai	Q (m^3h^{-1})	t (h)	Δ (m)			S (1)	T m^2s^{-1}		K ms^{-1}		
R3	200	72	7.80	1.46	1.26	0.62	0.10	0.65e-2	1.5e-2	4.3e-3	5.3e-3
FI	36	72	12.05	0.18	0.14	0.07	0.03	0.08e-2	2.3e-2	5.7e-3	5.8e-3
Q5	100	73	9.50	0.68	0.51	0.30	0.025	0.4e-2	2.6e-2	6.6e-3	5.6e-3
CDI	150	72	9.50	0.67	0.36	0.22	0.06	0.4e-2	3.5e-2	7.0e-3	6.3e-3
M4	104	72	2.42	0.65	0.51	0.35	0.04	0.45e-2	1.9e-2	3.8e-3	3.0e-3
H2	350	72	3.48	2.20	1.90	1.64	0.05	2.2e-2	2.6e-2	6.4e-3	6.5e-3
P2	340	69	2.86	0.74	0.41	0.54	0.05	5.0e-2	4.8e-2	8.0e-3	10.e-3
JI	280	72	5.60	1.78	1.51	0.68	0.03	1.5e-2	3.0e-2	4.5e-3	3.3e-3
Ba	51	72	2.60		0.83	0.31	0.02	0.5e-2	0.6e-2	1.5e-3	1.4e-3
HI 1	290	72	3.68	1.17	0.68	0.42	0.08	4.2e-2	4.7e-2	8.5e-3	7.5e-3
B4	175	48	6.95	0.83	0.69	0.40	0.03	0.8e-2	3.1e-2	5.5e-3	6.0e-3
F2	310	49	3.96	1.91	1.58	1.22	0.025	2.6e-2	2.3e-2	5.0e-3	7.5e-3
E3	340	48	4.10	1.72	1.19	0.74	0.06	2.3e-2	2.6e-2	4.0e-3	6.0e-3
FG 1	240	48	3.70	1.58	1.09	0.53	0.003	2.8e-2	4.5e-2	7.0e-3	4.0e-3
PM 3	340	48	3.73	1.40	1.04	0.85	0.03	4.06e-2	5.3e-2	10.e-3	8.0e-3
IJ 4	135	48	2.80	1.25	0.75	0.47		1.0e-2	1.8e-2	3.8e-3	4.4e-3
S2	355	48	3.93	1.45	0.67	0.53	0.06	3.5e-2	4.4e-2	6.5e-3	5.0e-3
P 4	290	48	5.02	1.91	1.38	0.96	0.05	2.5e-2	4.2e-2	6.5e-3	4.6e-3
G 5	323	48	3.74	0.75	0.42	0.11		3.8e-2	3.9e-2	6.5e-3	7.0e-3
M 3	348	49	4.26	2.17	1.75	0.60	0.048	2.5e-2	3.0e-2	4.0e-3	3.0e-3

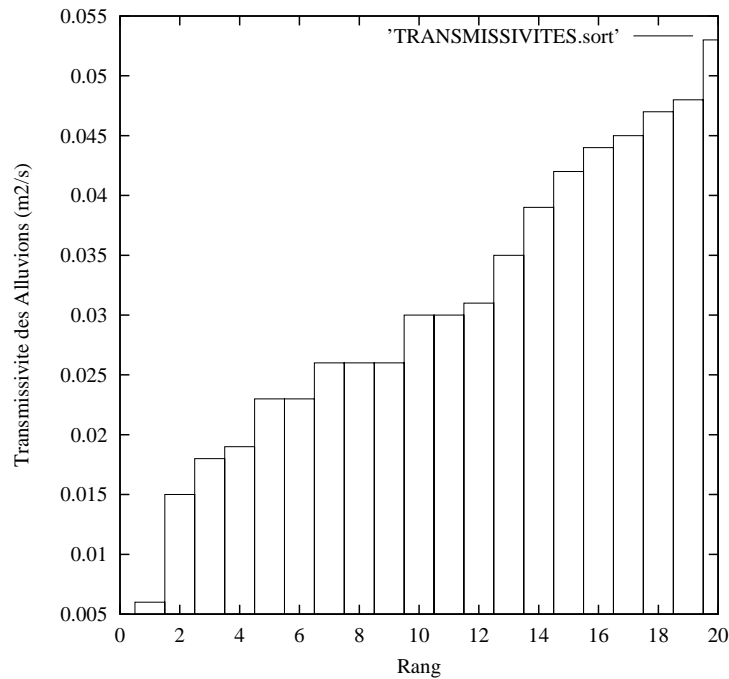


FIG. 6.10: Histogramme des transmissivités des Alluvions anciennes (essais de pompage BRGM (1965))

Cet histogramme montre que :

- la distribution est uniforme ;
- les mesures sont réparties sur un intervalle relativement étroit.

Ce résultat est étonnant car on a souvent trouvé, dans des contextes variés, que les transmissivités d'un même aquifère sont distribuées selon une loi log-normale² (Law, 1944 ; Bulnes, 1946 ; Warren *et al.*, 1961 ; Williardson et Hurst, 1965 ; Mc Millan, 1966 ; Bennion et Griffith, 1966 ; Brust *et al.*, 1968 ; Rousselot et Peyrieux, 1976 ; Rubin, 2004, etc).

Le fait que les essais, réalisés dans des forages captant simultanément les Alluvions anciennes *et* la partie supérieure de la Craie, aient été interprétés comme si ces deux formations constituaient un aquifère unique, doit conduire à des résultats quelque peu faussés. Cependant, les mesures qui ont servi à l'interprétation de ces essais ont été effectuées dans des piézomètres qui ne captaient que les Alluvions anciennes. On peut donc estimer que les transmissivités déterminées par ces essais (i) sont essentiellement celles des Alluvions, (ii) doivent être *surestimées*, dans la mesure où une fraction du débit pompé pendant chaque essai provenait de la partie de la Craie captée par le forage.

En définitive, les mesures disponibles de la transmissivité des Alluvions doivent conduire à une *surestimation* des débits de fuite, pour deux raisons :

1. les valeurs déduites des essais de pompage sont probablement un peu *surestimées* ;
2. les sites où ont été réalisés les essais de pompage ont été délibérément sélectionnés parmi environ 200 sites reconnus par sondages géologiques, parce qu'ils semblaient offrir les conditions d'exploitation les plus favorables.

Piézométrie

La charge hydraulique

En un point d'un système aquifère, la charge hydraulique représente l'énergie potentielle mécanique de l'eau par unité de poids. La charge hydraulique est dimensionnellement homogène à une longueur ; elle représente l'altitude du niveau d'eau qui s'établit dans un tube vertical enfoncé dans l'aquifère jusqu'au point considéré. La charge hydraulique est une fonction des coordonnées d'espace x, y, z et du temps t :

$$h = h(x, y, z, t)$$

Si le milieu aquifère est homogène et isotrope, les écoulements souterrains se font dans la direction de plus grande décroissance de la charge hydraulique, c'est-à-dire dans la direction du gradient de charge hydraulique.

En utilisant des mesures ponctuelles synchrones de la charge hydraulique dans des *piézomètres* captant un même aquifère, on établit des *cartes piézométriques* qui sont, en quelque sorte, des photographies de l'état de l'aquifère à un instant donné. D'une carte piézométrique, on peut tirer des renseignements utiles sur la profondeur de l'eau, les directions des écoulements souterrains, les limites des bassins souterrains, les zones de convergence (décharge) et de divergence (recharge) des lignes de courant, les relations avec les cours d'eau, les zones de variation brusque des perméabilité. . .

La comparaison de plusieurs cartes piézométriques caractéristiques de situations différenciées (hautes eaux/basses eaux) permet de mieux comprendre certains aspects du fonctionnement de l'aquifère considéré.

Pour construire une carte piézométrique, on dispose d'un nombre fini de mesures ponctuelles. À partir de ces valeurs, on doit construire une surface que l'on représentera graphiquement par des courbes isovaleurs, exactement comme la surface du sol est représentée par des courbes de niveau sur les cartes topographiques. Le problème de la construction d'une surface passant par un nombre fini de points de définition a une *infinité* de solutions.

²Le logarithme de la transmissivité suit une loi gaussienne.

Le procédé de construction classique³ des cartes piézométriques consiste à construire une triangulation dite de Delaunay, les sommets des triangles étant les points de mesure (piézomètres). Ensuite on effectue des interpolations linéaires entre chaque couple de points correspondant à deux sommets d'un même triangle. On obtient ainsi des positions estimées de points de définition des courbes iso-valeurs. La carte piézométrique est construite en joignant les points de définition successifs par une courbe plus ou moins lisse. On peut raffiner en tenant compte des conditions aux limites. Cette technique honore les mesures ponctuelles et donne une image plausible de la surface piézométrique. Elle comporte cependant plusieurs aspects critiquables :

- l'interpolation entre deux points n'a aucune raison d'être systématiquement linéaire ;
- le tracé des courbes passant par les points de définition est subjectif ;
- la surface obtenue n'a aucune raison de vérifier l'équation aux dérivées partielles qui régit les écoulements souterrains dans l'aquifère. C'est un problème majeur si cette surface est utilisée pour spécifier les conditions initiales d'un modèle.

La construction de cartes piézométriques pour l'aquifère des Alluvions anciennes présente une difficulté particulière, liée à la présence des lacs de gravière. Comme ces lacs possèdent une charge hydraulique et sont hydrauliquement connectés à l'aquifère des Alluvions, la surface piézométrique $h(x, y; t)$ est définie en tout point du système aquifère–lacs. Cette surface est continue mais pas partout dérivable par rapport aux coordonnées d'espace. La dérivée partielle de h par rapport à x ou y est discontinue sur le contour fermé des lacs de gravière. Si un côté d'un triangle recoupe un lac de gravière dont la charge hydraulique n'a pas été mesurée, le problème d'interpolation a un degré de liberté ; il est donc indéterminé.

Mesures piézométriques

Plusieurs séries de mesures piézométriques *quasi* synchrones dans les Alluvions anciennes sont disponibles. Elles sont reproduites dans les annexes C et D.

Mesures BRGM (1965). Les mesures effectuées par le BRGM (1965) sur l'ensemble de la Bassée, de Montereau à Nogent-sur-Seine, méritent d'être considérées. En 1965, le canal à grand gabarit n'existait pas et les gravières, relativement peu étendues, communiquaient directement avec la Seine. L'impact de ces gravières sur la nappe résultait de modifications mineures des conditions aux limites. Les piézométries de 1965 peuvent être considérées comme représentatives d'états peu perturbés de la nappe. Le rapport BRGM « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine » contient plusieurs cartes piézométriques à l'échelle 1/25 000 :

- surface piézométrique de la nappe en février 1965 (planche 4.III.1). Cette piézométrie, représentative des hautes eaux, ne s'appuie que sur 120 points de mesure ;
- surface piézométrique de la nappe en mai 1965 (planche 4.III.2). Cette carte a été construite avec 621 mesures ponctuelles ;
- surface piézométrique de la nappe en septembre 1965 (planche 4.III.4). Cette carte a été construite avec 599 points de mesure, dont 184 piézomètres.

Les principaux commentaires⁴ du rapport « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine » sont reproduits ci-après, pour leur intérêt propre, et parce qu'ils sont probablement la source des idées courantes sur l'hydrogéologie de la Bassée.

L'écoulement de la nappe se fait dans les deux versants crayeux en direction des Alluvions. Il y a donc effectivement alimentation de la masse alluviale par les bassins versants latéraux.

L'écoulement de la nappe dans les Alluvions se fait à la fois vers la Seine et vers l'aval de la plaine.

Un certain nombre de drainages annexes se reconnaissent au sud du Mériot, au sud d'Hermé, au Nord de Saint Sauveur par exemple.

³Utilisé, en particulier, pour la construction des cartes piézométriques de l'étude « Possibilités aquifères des alluvions du Val-de-Seine ».

⁴Certains d'entre eux dépendent d'un contexte qui n'est plus le même aujourd'hui.

Il faut remarquer un drainage particulier passant le long du coteau à Bazoches, Balloy, la Tombe ; ce drainage est créé artificiellement par le barrage constitué par le canal Bray-la Tombe bordé, par endroits, de palplanches battues jusqu'à la Craie.

Il faut remarquer de même un léger drainage créé par la vieille Seine aval à partir de Vimpelles ; ce drainage a été accru récemment par le dragage de la Vieille Seine.

Il existe une différence importante entre les gradients hydrauliques de la nappe libre de la Craie et ceux de la nappe des Alluvions. Dans l'aquifère de la Craie (coteaux), les gradients sont de 3 à 6 ‰ ; dans l'aquifère des Alluvions, les gradients sont de 0.5 à 2 ‰, en dehors des zones perturbées par les barrages.

Les barrages de navigation ont une influence locale, très nette, sur la piézométrie qui chute brusquement. Au barrage de la Grande Bosse, le dénivellé de la nappe atteint 2.5 m.

Il existe une crête piézométrique qui sépare la vallée de la Seine de celle de l'Yonne. Cette crête s'abaisse en direction de Montereau et, à partir de la boucle de Cannes-Écluse, l'Yonne alimente la Seine.

Dans le détail de l'écoulement alluvial, on distingue au moins deux crêtes piézométriques dues à des axes d'alimentation :

- celle existant au débouché de la vallée de la Voulzie ; cette crête piézométrique est constituée par l'apport de l'écoulement sous-fluvial dans la vallée de la Voulzie ;
- celle créée par le canal Bray-la Tombe en aval de Balloy.

La Seine est en rapport direct avec la nappe dont elle constitue le niveau de base. Cependant, si la résultante moyenne de l'écoulement se fait vers la Seine, dans le détail, la carte piézométrique montre un mécanisme plus compliqué : la Seine pouvant localement alimenter la nappe par ses deux rives ou par l'une de ses rives seulement.

La plupart des noues ne sont que des drains évacuateurs de crue et n'ont que peu de rapports avec la nappe. Ainsi la Vieille Seine amont et la Grande Noue d'Hermé qui, en cas de crue, récupèrent la majeure partie du flot, ne sont, le restant de l'année que des ruisseaux. Par contre, la Vieille Seine aval, draguée en aval de Vimpelles constitue un axe de drainage.

Les affluents de la Seine, l'Auxence, la Voulzie et l'Orvin semblent tous colmatés. L'Auxence coule 1 m au-dessus de la nappe.

Les canaux n'ont pas de rapport avec la nappe. Les mesures de niveau effectuées en septembre 1965 à quelques mètres des rives permettent de le confirmer. Le canal Bray-la Tombe forme un barrage pour la nappe, ses berges étant constituées par des palplanches battues jusqu'à la Craie en aval de Balloy.

Les sablières ont une importance certaine sur l'allure de la surface piézométrique. Spécialement dans la zone aval où il existe des sablières de grande étendue en communication avec la Seine par des canaux. Ces sablières augmentent le domaine d'action de la Seine et elles sont le siège d'un drainage important par lequel l'eau souterraine est perdue au profit du fleuve. Le phénomène existe également en période de hautes eaux de la Seine. On aurait pu penser que lorsque le niveau de la Seine monte très haut, l'eau de rivière vient envahir les sablières. Or, pour de nombreuses sablières situées à l'aval de Bray, on a pu observer un contraste entre l'eau claire et bleutée en provenance de la nappe et l'eau jaunâtre du fleuve. Lorsque la sablière est reliée au fleuve par un chenal artificiel, l'eau claire s'écoule dans la Seine et donne naissance à des tourbillons que l'on voit se mélanger peu à peu avec l'eau limoneuse qui l'entraîne.

Mesures du Projet Bassée. Un réseau d'une centaine de piézomètres, répartis entre Montereau et Bray-sur-Seine, a été constitué dans le cadre du Projet Bassée (figure 6.11). Ce réseau comporte :

- des piézomètres ordinaires, où l'on peut effectuer des mesures manuelles ;
- des piézomètres équipés d'un enregistreur électronique du niveau de l'eau ;
- des échelles limnimétriques associées à un enregistreur, dans cinq lacs de gravière.

Les mesures effectuées dans ce réseau sont présentées dans l'annexe E.

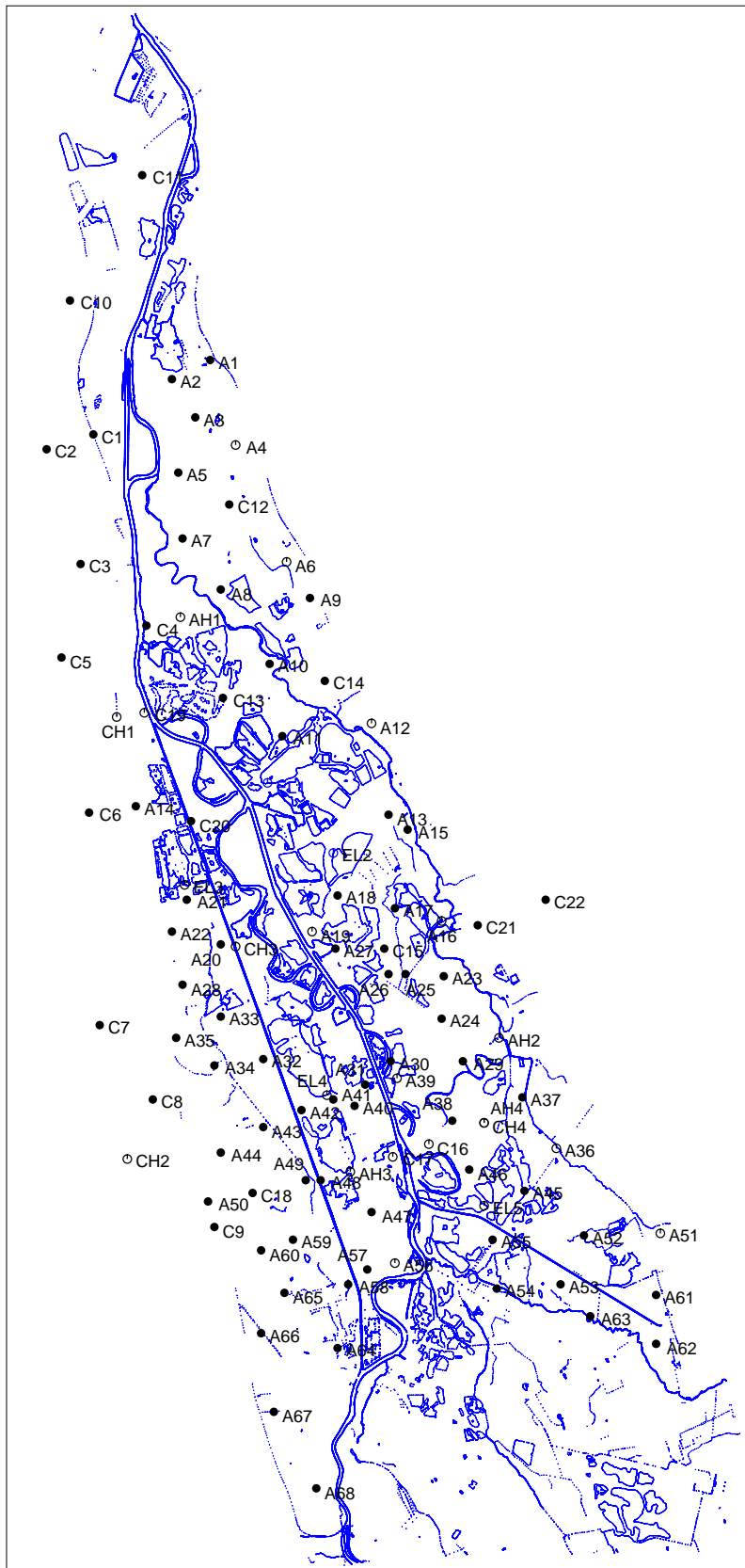


FIG. 6.11: Piézomètres du Projet Bassée.

La piézométrie actuelle de la Bassée aval est très différente de celle de 1965. Trois facteurs structuraux expliquent ces différences : le canal à grand gabarit, les annexes hydraulique de ce canal et les lacs de gravière.

Des campagnes générales de piézométrie ont été effectuées par SOBESOL du 10 au 11 octobre 2002, du 19 au 21 février 2003 et du 13 au 14 octobre 2003.

Par unité de surface horizontale, les lacs de gravière emmagasinent dix à vingt fois plus d'eau que l'aquifère des Alluvions. Ils ont, de ce fait, une inertie hydraulique nettement supérieure à celle des Alluvions aquifères. Ils constituent donc des *régulateurs* qui tendent à compenser toute variation rapide de la piézométrie de la nappe. Les variations de la charge hydraulique doivent être d'autant plus amorties que la superficie en lacs est plus grande dans l'environnement du point considéré.